

解冻方式对冻结鸡汤流变与蛋白质的影响

Effect of thawing method on rheology and protein of frozen chicken soup

唐 棋¹ 夏杨毅^{1,2} 侯佰慧¹ 梅甜恬¹

TANG Qi¹ XIA Yang-yi^{1,2} HOU Bai-hui¹ MEI Tian-tian¹

(1. 西南大学食品科学学院, 重庆 400715; 2. 重庆市特色食品工程技术研究中心, 重庆 400715)

(1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Special Food Programme and Technology Research Center, Chongqing 400715, China)

摘要:探究解冻方式(微波、高温水浴、室温空气解冻)对冻结鸡汤(−20, −40 °C 冻结)流变与蛋白质的影响。结果表明:冻结鸡汤解冻后汤体具有假塑性;相同剪切速率条件下, −20 °C 冻结鸡汤室温空气解冻后黏度和剪切应力均大于 −40 °C 冻结鸡汤,但微波、高温水浴解冻后的黏度和剪切应力趋势线几乎完全重合,且均低于室温空气解冻组。同一冻结鸡汤室温空气解冻后的胶原蛋白含量、可溶性蛋白含量、巯基含量和乳化活性均显著高于其他解冻方式($P < 0.05$),但羰基含量显著低于其他解冻方式($P < 0.05$)。因此,不同解冻方式的冻结鸡汤流变和蛋白质变化较大,且微波、高温水浴解冻对冻结鸡汤的影响比室温空气解冻更大。

关键词:鸡汤;解冻方式;流变特性;蛋白质

Abstract: The effects of different thawing methods, including microwave, high-temperature water bath, and room temperature air, on the rheology and protein of frozen chicken soup (freezing at −20 °C and −40 °C) were investigated. The results showed that thawed frozen chicken soup had pseudoplasticity. Under the same shear rate, the viscosity and shear stress of frozen chicken soup at −20 °C were greater than those in the −40 °C frozen chicken soup. However, the thawing viscosity and shear stress by microwave and high temperature thawing trended preformed almost the same, both were lower than the room temperature air thawing group. The frozen collagen solution, soluble protein content, sulfhydryl content and emulsifying activity of the same frozen chicken soup were significantly higher than other thawing methods ($P < 0.05$), but the carbonyl content was significantly lower than other thawing methods ($P < 0.05$). Therefore, the rheological and protein oxidation characteristics of frozen chicken soups with different thawing methods changed

greatly, while the effects of microwave thawing and high temperature water bath thawing on frozen chicken soups were greater than room temperature air thawing.

Keywords: chicken soup; thawing method; rheological properties; protein

鸡汤的营养物质易被人体吸收利用,身体虚弱或术后病人食用不仅增强食欲,还能短期改善精神状态^[1]。传统鸡汤熬制时间较长,方便的即食冻结鸡汤对生活节奏快的人们无疑是更好地选择。而冻藏是储藏食品较好的办法之一^[2],且鸡汤冻藏能较好保持其营养品质和延长货架期^[3],工业上常用 −40 °C 进行速冻处理,而家用冰箱仅能完成 −20 °C 缓冻处理,2 种冻结鸡汤的品质差异显著^[4]。解冻是冻藏食品食用前的最后一个环节,对于解冻的相关研究主要集中在解冻方式和解冻工艺对鸡肉营养物质^[5]、品质^[6]、风味^[7]的影响。

食品流变特性反映流体性能,与物质组成有关,为食品开发、工艺设计等提供参考^[8]。相关研究主要集中在果汁、乳制品等方面^[9],而关于鸡汤的流变特性的研究相对较少,仅有酶解熬制^[10]和不同冻结速率^[4]对鸡汤流变特性影响的研究,而解冻后鸡汤流变特性不仅与鸡汤物质组成和营养有关,更是影响鸡汤口感和风味的重要特性^[11]。因此,本研究结合实际情况,研究鸡汤解冻后油脂凝结分层现象,拟探讨微波、高温水浴、室温空气 3 种解冻方式对冻结鸡汤的流变和蛋白质的影响,为实现即食冻结鸡汤的工业化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

湘佳青脚母鸡:日龄 150 d,体重 1.5 kg,购于重庆北碚永辉超市;

牛血清蛋白生化试剂:分析纯,上海伯奥生物科技有限公司;

羟脯氨酸生化试剂:分析纯,德国 Ruibio 公司;

氯胺 T、对二甲氨基苯甲醛、浓硫酸、五水硫酸铜、氢氧

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(编号:201303082-7);四川省科技支撑计划(编号:2016NZ0003-05)

作者简介:唐棋,女,西南大学在读硕士研究生。

通信作者:夏杨毅(1970—),男,西南大学副教授,硕士导师,博士。

E-mail: 265835528@qq.com

收稿日期:2018-06-08

化钠、酒石酸钾钠:分析纯,成都市科龙化工试剂厂。

1.2 仪器设备

- 冰箱:BCD-160TB 型,青岛海尔股份有限公司;
- 电磁炉:C21-RT2121 型,广东美的生活电器制造有限公司;
- 热电偶温度计;YHT309 型,深圳市源恒通科技有限公司;
- 数显恒温水浴锅:HH-S6 型,常州普天仪器制造有限公司;
- 微波炉:G80F20CN2L-B8 型,格兰仕微波炉电器有限公司;
- 冷冻离心机:AvantiJ-30I 型,美国贝克曼库尔特公司;
- 可见分光光度计:722-P 型,上海现科仪器有限公司;
- 流变仪:DHR-1 型,美国 TA 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备

- (1) 鸡汤熬煮处理:净膛,清洗,切割成大小为 3 cm×3 cm×3 cm 块状,沸水预煮 3 min 去血水,控水后称重,按料液比 1:2 (g/mL)加水煮沸后,微沸熬煮 3 h。冷却至室温,然后用 2 层 200 目无菌纱布过滤,4 500 r/min 离心 20 min 去脂肪,分装于已灭菌离心管中,密封用于整个试验。
- (2) 鸡汤冻结处理:于冰箱冷藏室(4 ℃)预冷 6 h,中心温度降为 10 ℃后,随机分成 2 组,分别放入-20,-40 ℃冰箱恒温冻结。鸡汤中心温度至-18 ℃时完成冻结,3 d 内进行解冻处理。
- (3) 微波解冻:将装有样品的离心管置于微波炉中,选择“快速解冻”模式,每个离心管解冻时间 5 min,为了保证解冻均匀,每隔 10 s 快速摇晃离心管,进行指标测定。
- (4) 高温水浴解冻:将冻结鸡汤置于恒温摇床中高温(70 ℃)水浴解冻,设置振动,中心温度至 5 ℃结束解冻,进行相关测定。
- (5) 室温空气解冻:将冻结鸡汤置于(25±1) ℃、周围没有热源的环境中,30 min 摇晃一次,中心温度至 5 ℃结束解冻,进行相关测定。

1.3.2 指标测定

- (1) pH 的测定:按 GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品 pH 的测定》执行。
- (2) 电导率的测定:取 20 mL 解冻完成的鸡汤样品,平衡至室温,具体操作参照文献[12]。
- (3) 流变指标测定:分析剪切速率与黏度、剪切应力的关系,具体操作参照文献[10]。用 Origin 8 对数据进行处理。用幂律方程[式(1)]对鸡汤流变曲线数据进行回归分析,得到 K 、 n 、复相关系数 R^2 。
$$\tau=K \times \gamma^n,$$
式中:
 - τ ——剪切应力,Pa;
 - K ——稠度系数,Pa·s^{*n*};
 - γ ——剪切速率,s⁻¹;
 - n ——流体指数。
- (4) 可溶性蛋白含量测定:取解冻结束的样品 0.5 mL

- 于试管中,用蒸馏水定容至 1 mL,样品:双缩脲试剂=1:4 (体积比),混均,静置 30 min,于 540 nm 波长下测定吸光值。采用牛血清标准溶液绘制标准曲线($y=0.048\ 7x+0.177\ 9$, $R^2=0.999\ 2$)。
- (5) 胶原蛋白含量测定:称取 4 g 鸡汤于烧瓶中,加入 3 mol/L 硫酸溶液 30 mL,水解,用蒸馏水定容至 250 mL;鸡汤水解产物:氯胺 T 试剂:对二甲氨基苯甲醛显色剂=2:1:1(体积比);60 ℃水浴 20 min,冷却后放置 30 min,于 558 nm 波长下测定吸光度,采用羟脯氨酸标准品绘制标准曲线($y=0.203\ 4x+0.003\ 2$, $R^2=0.998\ 7$)。通过式(2)计算胶原蛋白含量。
$$X=\frac{K \times A}{M \times F} \times S,$$
式中:
 - X ——鸡汤中胶原蛋白含量,mg/g;
 - K ——胶原蛋白水解为羟脯氨酸系数,11.1;
 - A ——标准曲线得出鸡汤中羟脯氨酸的含量,μg/mL;
 - M ——鸡汤的质量,g;
 - F ——单位换算系数,1 000;
 - S ——稀释倍数,2 500。
- (6) 鸡汤全蛋白的提取和蛋白特性的测定:解冻鸡汤 5 000 r/min 离心 30 min,取上清液;脱脂,鸡汤:正己烷=1:1(体积比),取下清液;沉淀,样液:三氯乙酸(5%)=1:5(体积比),沉淀为解冻鸡汤全蛋白,透析后冷冻干燥得到鸡汤蛋白粉备用。取 3 g 鸡汤蛋白粉,加入 85 ℃保温的 5% SDS 溶液 27 mL,均质 5 min,85 ℃保温 1 h,4 000 r/min 离心 20 min 后,取上清液定量用于蛋白指标测定。
- 全蛋白的乳化性根据文献[13]采用浊度法测定;表面疏水性根据文献[14]的方法测定;总巯基基团含量的测定根据文献[15]使用 Ellman 试剂法进行测定;羰基的测定根据文献[16]的测定方法。

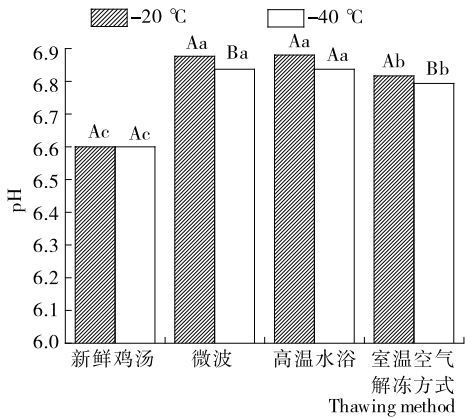
1.4 数据分析

采用 Spss 17.0 软件进行统计分析,使用 LSD 法($P<0.05$)比较平均值之间的差异性。所检测指标重复测定 3 次,试验数据采用平均值±标准差形式。

2 结果与分析

2.1 对冻结鸡汤 pH 值的影响

pH 可以衡量体系酸碱环境,影响鸡汤口感。如图 1 所示,从同一冻结鸡汤的 3 种解冻方式来看,室温空气解冻鸡汤 pH 与新鲜鸡汤最接近且最低($P<0.05$),而微波解冻和高温水浴解冻鸡汤 pH 与新鲜鸡汤差异显著($P>0.05$),与常海军等^[11]研究结论相似。迟雪露等^[17]研究表明牛乳酸度值差异与脂肪含量有关,虽然鸡汤是蛋白、脂肪等多种物质的混合体系,但本试验鸡汤静置,离心去除部分脂肪,简化为粗蛋白体系。因此 pH 变化可能是蛋白质二三级结构的稳定主要靠次级键,包括氢键、疏水键以及范德华力等,这些次级键易受环境因素影响引起氨基酸残基侧链间的结合变化,改变蛋白质结合 H 离子能力,使体系 pH 值发生变化^[18]。对于同一解冻方式,微波和高温水浴解冻后的 2 种冻结鸡汤间



小写字母不同代表同一冻结温度下不同解冻方式间差异显著($P<0.05$);大写字母不同代表同一解冻方式下不同冻结温度间差异显著($P<0.05$)

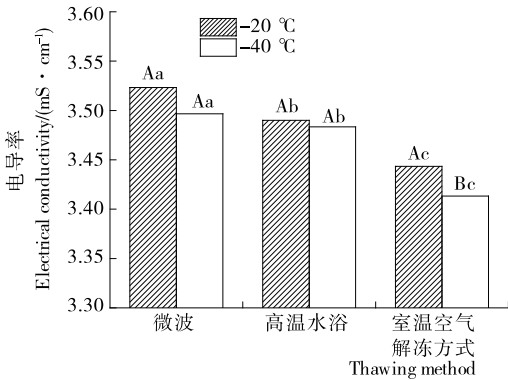
图 1 解冻方式对冻结鸡汤 pH 的影响

Figure 1 Effects of different thawing methods on pH of frozen chicken soup

pH 值差异不显著($P>0.05$),但-20 °C 冻结鸡汤室温空气解冻后的 pH 高于-40 °C 冻结鸡汤,且差异显著($P<0.05$),与刘书来等^[19]发现快速冻结鲤鱼 pH 较低的结论一致。

2.2 对冻结鸡汤电导率的影响

电导率受溶液中所含盐成分、离子成分等组成物质的影响,一定程度上可以反映体系中物质的变化情况^[20]。如图 2 所示,从同一冻结鸡汤的 3 种解冻方式来看,室温空气解冻鸡汤电导率最低($P<0.05$),不同冻结温度间,微波解冻和高温水浴解冻鸡汤电导率差异不显著($P>0.05$),沙小梅等^[21]研究表明蛋白含量较高或 pH 值较低的体系,电导率值大,与本研究结果一致。对于同一解冻方式的 2 种冻结鸡汤而言,-20 °C 冻结鸡汤解冻后的电导率高于-40 °C 冻结鸡汤的,且室温空气解冻组差异显著($P<0.05$),可能是长时间的室温空气解冻,蛋白结构会被慢速冻结所形成的较大冰晶颗粒破坏,改变氨基酸侧链基团周围水的结合状态,溶解度发



小写字母不同代表同一冻结温度下不同解冻方式间差异显著($P<0.05$);大写字母不同代表同一解冻方式下不同冻结温度间差异显著($P<0.05$)

图 2 解冻方式对冻结鸡汤电导率的影响

Figure 2 Effects of different thawing methods on electrical conductivity of frozen chicken soup

生变化,与侯佰慧等^[4]的研究结果一致。

2.3 对冻结鸡汤流变特性的影响

如图 3 所示,剪切速率为 0~50 s⁻¹时,解冻鸡汤黏度迅速下降,50 s⁻¹之后逐渐趋于平稳,此流体具有假塑性。初始的解冻鸡汤黏度较大是由于蛋白质分子间基团的相互作用随着剪切速率增加,汤体中物质周围的水环境被破坏,相互作用力减弱,进而改变了解冻鸡汤黏度出现剪切稀化现象。剪切速率相同条件下,同一解冻方式的一20 °C 冻结鸡汤室温空气解冻后黏度大于-40 °C 冻结组,微波解冻和高温水浴解冻后的鸡汤黏度变化趋势线几乎完全重合,且均低于室温空气解冻组。可能是一40 °C 快速冻结鸡汤的冰晶体积小,室温空气解冻后的汤体更均匀、体系流动阻力更小;但微波和高温水浴解冻速度快,导致解冻鸡汤中蛋白之间的结构遭到破坏,因此剪切力值较低、黏度值较小^[4],表明微波和高温水浴解冻对鸡汤黏度的影响大于冻结速率引起的。

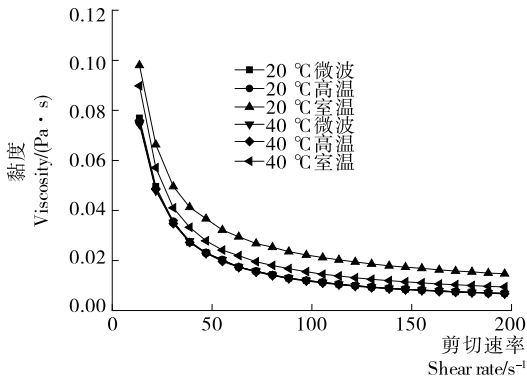


图 3 解冻方式对冻结鸡汤黏度的影响

Figure 3 The effects of different thawing methods on viscosity of frozen chicken soup

如图 4 所示,随剪切速率的增大,室温空气解冻组的剪切应力较微波和高温水浴解冻组增加快,但都属于非线性增大关系。剪切速率相同条件下,同一解冻方式的一20 °C 冻结鸡汤室温空气解冻后剪切应力大于-40 °C 冻结组,并明显高于其他解冻方式;剪切速率为 0~300 s⁻¹时,微波和高温水浴解冻鸡汤的剪切应力没有区别、趋势线几乎重合,超过 300 s⁻¹后的剪切应力才有所差异。说明室温空气解冻条件下的鸡汤流体剪切应力更受冻结速率影响,但微波和高温水浴解冻方式对鸡汤体系结构和剪切应力影响作用大于冻结速率。由图 4 数据进行非线性回归拟合分析,结果如表 1 所示。室温空气解冻组的 R^2 为 0.982 83,0.939 86,表明回归方程对室温空气解冻组的流变特性曲线进行了较好的拟合。室温空气解冻组的稠度系数较其他解冻组高,与黏度结果一致。所有解冻组的流态指数都 <1 ,表明解冻后鸡汤具有假塑性。

Goudoulas 等^[22]通过研究混合物质体系的流变特性,得出其流变动力学与纯物质体系不同,混合物质体系的流变特性更为复杂。而鸡汤是混合体系的一种,因此流变特性会与体系中的蛋白特性和物质组成等因素有关。

表 1 不同解冻方式鸡汤的静态流变参数[†]

Table 1 Static rheological parameters of chicken soup with different thawing methods

解冻方式	$K/(Pa \cdot s^n)$	n	R^2
-20℃微波解冻	0.210 89	0.370 85	0.830 28
-20℃高温解冻	0.210 89	0.370 85	0.841 84
-20℃室温解冻	0.180 63	0.401 43	0.982 83
-40℃微波解冻	0.267 73	0.456 44	0.839 12
-40℃高温解冻	0.223 87	0.358 40	0.829 71
-40℃室温解冻	0.250 87	0.332 72	0.939 86

[†] 小写字母不同代表同一冻结温度下不同解冻方式间差异显著($P<0.05$);大写字母不同代表同一解冻方式下不同冻结温度间差异显著($P<0.05$)。

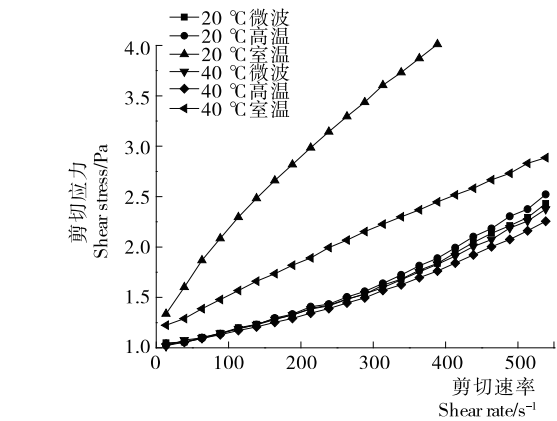


图 4 解冻方式对冻结鸡汤剪切应力的影响

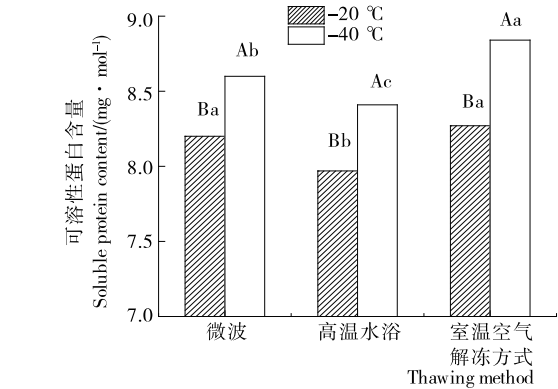
Figure 4 The effects of different thawing methods on shear stress of frozen chicken soup

2.4 对冻结鸡汤蛋白质组成和氧化特性的影响

2.4.1 可溶性蛋白含量 鸡汤是包含蛋白、肽、脂肪、矿物元素等物质的复杂体系,但蛋白类仍是主体,相应的组成和特性变化对鸡汤的流变有着显著影响。

由图 5 可知,从同一冻结鸡汤的 3 种解冻方式来看,高温水浴解冻鸡汤的可溶性蛋白含量最低($P<0.05$),与张根生等^[23]的研究结果一致。对于同一解冻方式的 2 种冻结鸡汤而言,-40℃冻结鸡汤的可溶性蛋白含量与-20℃冻结鸡汤差异显著($P<0.05$)。白登荣等^[24]研究发现肌原纤维蛋白分子间通过二硫键桥形成不溶性蛋白质聚集体和蛋白质的氧化变性,导致可溶性蛋白质含量降低;而微波解冻使冻结物品在一定频率的电磁波作用下快速完成解冻,耗时短,从而使体系在蛋白质容易变性的温度带即-5~0℃停留时间短,蛋白损失少。而冻结使体系中水分的重新分布,而蛋白质表面与水分接触的功能性基团由于表面分布的水分被移去,产生浓缩效应,使蛋白质发生变性^[25],解冻后导致蛋白质溶解性降低,表现为可溶性蛋白含量降低,试验结果表明快速冻结可减少聚集变性。

2.4.2 胶原蛋白含量 胶原蛋白在体系中起到乳化和增稠作用,与鸡汤口感密切相关^[26]。如图 6 所示,从同一冻结鸡



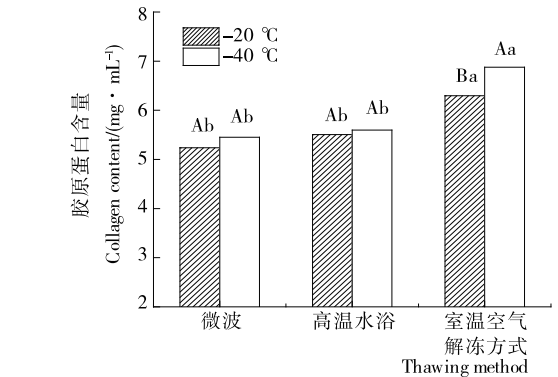
小写字母不同代表同一冻结温度下不同解冻方式间差异显著($P<0.05$);大写字母不同代表同一解冻方式下不同冻结温度间差异显著($P<0.05$)

图 5 解冻方式对冻结鸡汤可溶性蛋白含量的影响

Figure 5 Effects of different thawing methods on soluble protein content of frozen chicken soup

汤的 3 种解冻方式来看,室温空气解冻鸡汤胶原蛋白含量显著高于其他解冻方式($P<0.05$),且微波解冻和高温水浴解冻鸡汤胶原蛋白含量没有显著差异($P>0.05$)。肽键将各种氨基酸连接起来构成胶原蛋白,解冻处理促使侧链氢键与离子键被破坏,多聚体变为低聚体,胶原蛋白含量偏低。对于室温空气解冻后的 2 种冻结鸡汤而言,-20℃冻结鸡汤室温空气解冻后的胶原蛋白含量显著低于-40℃冻结鸡汤($P<0.05$),因为冻结温度越高,冰晶越大,对胶原蛋白纤维空间结构的损伤越严重,使胶原蛋白分子发生较大程度的分解^[27]。溶液黏度会因胶原蛋白浓度改变而发生显著变化,进而影响鸡汤黏稠度,黏稠度大的鸡汤口感更为细腻和醇厚^[28]。因此鸡汤的流变性质与鸡汤体系中的可溶性蛋白与胶原蛋白含量以及蛋白结构特性有一定的关系。

2.4.3 巯基含量 鸡汤冻结后解冻处理,相当于完成一次冻融过程,使鸡汤蛋白氧化特性受到影响,而氧化程度可用巯基含量表示。如图 7 所示,从同一冻结鸡汤的 3 种解冻方式来看,室温空气解冻鸡汤的巯基含量显著高于其他解冻方式

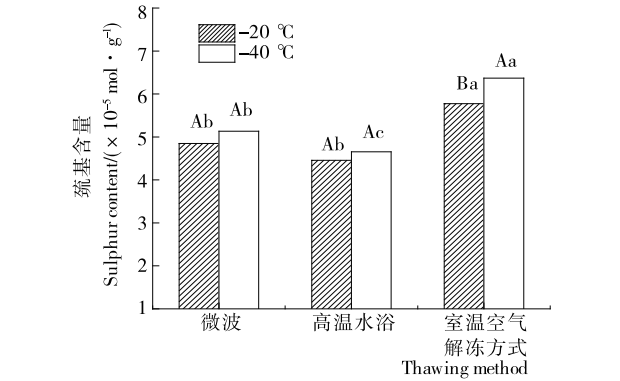


小写字母不同代表同一冻结温度下不同解冻方式间差异显著($P<0.05$);大写字母不同代表同一解冻方式下不同冻结温度间差异显著($P<0.05$)

图 6 解冻方式对冻结鸡汤胶原蛋白含量的影响

Figure 6 Effects of different thawing methods on collagen content of frozen chicken soup

($P<0.05$);对于同一解冻方式的 2 种冻结鸡汤, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结鸡汤室温空气解冻后的巯基含量显著低于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结鸡汤 ($P<0.05$)。表明微波解冻和高温水浴解冻蛋白质分子的结构变化暴露了分子内部的巯基,加快汤体中自由基对分子基团的攻击,此外研究^[29]表明在蛋白质变性与降解过程中巯基含量显著降低,而室温空气解冻方式对巯基含量的影响相对较弱,与蛋白含量结果一致。研究^[30]还发现增加冻融次数可以降低蛋白巯基含量,因此速冻鸡汤食用时按需解冻,避免反复冻融的发生,降低各种促氧化物质如自由基对蛋白质分子的攻击。



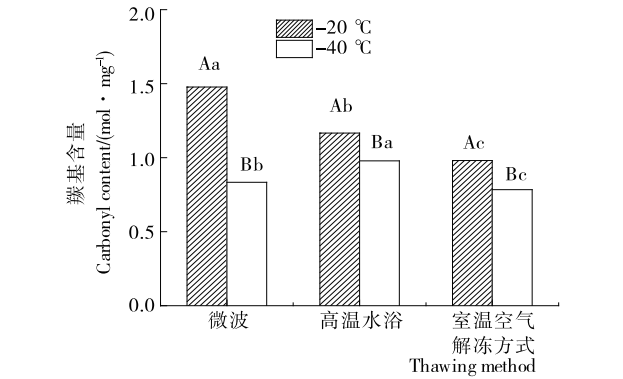
小写字母不同代表同一冻结温度下不同解冻方式间差异显著($P<0.05$);大写字母不同代表同一解冻方式下不同冻结温度间差异显著($P<0.05$)

图 7 解冻方式对冻结鸡汤巯基含量的影响
Figure 7 Effects of different thawing methods on sulphur content of frozen chicken soup

2.4.4 羰基含量 由于蛋白质肽链上带有 NH— 及 $\text{NH}_2—$ 基团,其氨基酸侧链受到自由基的攻击,使其断裂形成羰基,从而导致羰基含量增加,使蛋白质氧化程度增大。如图 8 所示,3 种解冻方式对鸡汤的羰基含量均有显著影响($P<0.05$),且室温空气解冻鸡汤的羰基含量最低($P<0.05$),与朱文慧等^[29]的研究结果类似,冻结鸡汤所形成的冰晶,在微波和高温水浴的较高温度下迅速融化,造成物质结构发生变化,自由基攻击概率变大,羰基含量变大。且同一解冻方式的一 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结鸡汤的羰基含量显著低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结鸡汤 ($P<0.05$),进一步说明快速冻结可缓解羰基产生。

2.4.5 表面疏水性与乳化活性 蛋白质的表面疏水性能表示蛋白质的变性程度,它与蛋白质分子表面疏水性氨基酸的相对含量有关。对某种蛋白质来说,表面疏水性与蛋白质的变性程度呈正相关^[30]。如表 2 所示,3 种解冻方式对鸡汤的疏水性均有显著影响($P<0.05$),高温水浴解冻鸡汤的疏水性最高($P<0.05$),蛋白质的疏水性基团在高温条件下逐渐暴露,表面疏水性也就随着疏水残基增多而增大^[29]。同一解冻方式的一 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结鸡汤的疏水性显著高于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结鸡汤 ($P<0.05$),慢速冻结使得蛋白与蛋白之间发生聚合的概率增大,肽键通过疏水相互作用发生聚集变性,导致表面疏水性下降^[31]。

体系稳定性与物质乳化活性和乳化稳定性有关。如表 2



小写字母不同代表同一冻结温度下不同解冻方式间差异显著($P<0.05$);大写字母不同代表同一解冻方式下不同冻结温度间差异显著($P<0.05$)

图 8 解冻方式对冻结鸡汤羰基含量的影响
Figure 8 The effects of different thawing methods on carbonyl content of frozen chicken soup

表 2 解冻方式对速冻鸡汤表面疏水性与乳化活性的影响[†]
Table 2 The effects of different thawing methods on surface hydrophobicity and emulsifying activity of frozen chicken soup

解冻方式	溴酚蓝/ μg	乳化活性/ (m ² · g ⁻¹)	乳化稳定性/ %
-20 °C 微波	10.16±0.30 ^{Bb}	4.21±0.01 ^{Bb}	29.28±0.32 ^{Ac}
-20 °C 高温	12.57±0.30 ^{Ba}	3.37±0.12 ^{Bc}	35.71±1.15 ^{Ab}
-20 °C 室温	7.92±0.30 ^{Bc}	6.86±0.29 ^{Aa}	39.61±0.93 ^{Aa}
-40 °C 微波	13.26±0.30 ^{Ac}	4.51±0.18 ^{Aa}	26.91±0.32 ^{Ab}
-40 °C 高温	16.19±0.30 ^{Aa}	4.23±0.03 ^{Ab}	28.99±0.50 ^{Bb}
-40 °C 室温	15.33±0.30 ^{Ab}	4.75±0.12 ^{Ba}	35.44±1.24 ^{Ba}

[†] 小写字母不同代表同一冻结温度下不同解冻方式间差异显著($P<0.05$);大写字母不同代表同一解冻方式下不同冻结温度间差异显著($P<0.05$)。

所示,从同一冻结鸡汤的 3 种解冻方式来看,鸡汤高温水浴解冻后的乳化活性显著低于其他 2 种解冻方式($P<0.05$),这是因为乳化活性与表面疏水性呈负相关^[32]。从同一冻结鸡汤的 3 种解冻方式来看,微波和高温水浴解冻鸡汤的乳化稳定性与室温空气解冻鸡汤差异显著($P<0.05$);由于解冻后,体系的黏度降低,从而导致物质的扩散系数和沉降速度增加,不利于体系稳定性^[33]。对于同一解冻方式, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结鸡汤室温空气和高温水浴解冻后的乳化稳定性显著高于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结鸡汤 ($P<0.05$),与不同冻结速率下鸡汤体系中油脂含量、卵磷脂、明胶分子等物质百分比不同有关。为了提高鸡汤乳化稳定性,调节体系油脂含量或者复配蔗糖酯、黄原胶或卡拉胶等乳化剂,可防止鸡汤处理后分层。

3 结论

冻藏鸡汤的品质特性会受冻结速率的影响,而微波、高温水浴和室温空气解冻是常用的解冻方法,室温空气解冻温度较低、时间相对较长,而微波和高温水浴解冻过程的温度较高、速度较快。室温空气解冻、微波和高温水浴解冻后的

冻结鸡汤均属于剪切稀化的假塑性流体;随着剪切速率的增加,冻结鸡汤解冻后的剪切应力与黏度,呈相反变化趋势;2种冻结鸡汤室温空气解冻后黏度和剪切应力均大于其他解冻方式,但微波解冻和高温水浴解冻后的黏度和剪切应力趋势线几乎完全重合。冻结鸡汤室温空气解冻后的胶原蛋白含量、可溶性蛋白含量、巯基含量和乳化活性均显著高于微波解冻和高温水浴解冻($P<0.05$)。因此,解冻方式对冻结鸡汤流变和蛋白特性有影响,且微波和高温水浴解冻对冻结鸡汤的影响比室温空气解冻更大。但不同解冻方式以及适合热食的长时间微波和高温水浴解冻对冻结鸡汤品质和风味变化仍需进一步研究。

参考文献

[1] 文杰. 国内外肉鸡产业现状及未来发展对策[J]. 北方牧业, 2016,18(2): 18-19.

[2] ZHANG Xin, GAO Tian, SONG Lei, et al. Effects of different thawing methods on the quality of chicken breast[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 52(9): 2 097-2 015.

[3] 余力, 贺稚非, 李洪军, 等. 不同贮藏方式对高压鸡汤品质的影响及货架期预测模型的建立[J]. 食品科学, 2016, 37(20): 274-281.

[4] 侯佰慧, 张维悦, 夏杨毅, 等. 冻结速率对鸡汤理化及流变特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(2): 81-86.

[5] RAHBARI M, HAMDAMI N, MIRZAEI H, et al. Effects of high voltage electric field thawing on the characteristics of chicken breast protein[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 216(1): 98-106.

[6] ALI S, ZHANG Wan-gang, RAJPUT N, et al. Effect of multiple freeze-thaw cycles on the quality of chicken breast meat[J]. Food Chemistry, 2015, 173(8): 808-814.

[7] 张艳, 夏杨毅, 何翠, 等. 基于肉鸡性别的鸡汤挥发性物质主成分分析[J]. 食品与机械, 2016, 32(7): 23-28.

[8] UMEMOTO L D M. Rheological properties of fruits and vegetables: a review[J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(6): 1 191-1 210.

[9] KUMAR R, BAWA A S, MANJUNATHA S S, et al. Effect of pulsed electric field and pasteurisation treatments on the rheological properties of mango nectar (*Mangifera indica*)[J]. Croatian Journal of Food Science & Technology, 2015, 7(1): 22-33.

[10] 陈雅韵, 夏杨毅, 李洪军, 等. 酶解鸡汤的流变学特性研究[J]. 食品工业科技, 2014, 23(12): 107-110.

[11] 常海军, 唐翠, 唐春红. 不同解冻方式对猪肉品质特性的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(10): 1-5.

[12] 瓦云超, 赵海晴, 李仁芳, 等. 热处理对水牛乳物化性质的影响[J]. 中国乳品工业, 2016, 44(5): 15-17.

[13] 林静. 茶多酚处理对微冻泥鳅保鲜效果的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2017: 53-54.

[14] CHELH I, GATELLIER P, SANTELHOUTELLIER V. Technical note: A simplified procedure for myofibril hydrophobicity determination[J]. Meat Science, 2006, 74(4): 681-683.

[15] SIMPLICIO P D, CHEESEMAN K H, SLATER T F. The Reactivity of the sh group of bovine serum albumin with free radicals[J].

Free Radical Research Communications, 1991, 14(4): 253-262.

[16] OLIVER C N, AHN B W, MOERMAN E J, et al. Age-related changes in oxidized proteins [J]. Journal of Biological Chemistry, 1987, 262(12): 5 488.

[17] 迟雪露, 全令君, 潘明慧, 等. 乳脂肪含量对牛乳理化性质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(4): 26-31.

[18] 郑红, 苏现波, 张晓洁, 等. 货架期冷藏过程中鳙鱼肉理化指标及蛋白质变化规律[J]. 食品科学, 2018, 39(7): 215-220.

[19] 刘书来, 李向阳, 章茜琳, 等. 大洋性围网鲮鱼船上冷盐水快速冻结和慢速冻结的比较[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(12): 73-78.

[20] LI Dan-dan, ZHANG Yao, YANG Na, et al. Impact of electrical conductivity on acid hydrolysis of guar gum under induced electric field[J]. Food Chemistry, 2018, 259(1): 157-165.

[21] 沙小梅, 涂宗财, 王辉, 等. 提取 pH 对鲮鱼鱼鳞明胶功能性质的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(12): 12-16.

[22] GOUDOULAS T B, GERMANN N. Phase transition kinetics and rheology of gelatin-alginate mixtures[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 66(5): 49-60.

[23] 张根生, 张红蕾, 岳晓霞, 等. 低温静水解冻对鸡胸肉品质特性的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 167-172.

[24] 白登荣, 董唯, 齐昕宇, 等. γ -聚谷氨酸对鸡肉肌原纤维蛋白功能特性的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 35-40.

[25] TU Zong-cai, ZHONG Bi-zhen, WANG Hui. Identification of glycated sites in ovalbumin under freeze-drying processing by liquid chromatography high-resolution mass spectrometry[J]. Food Chemistry, 2017, 226(38): 1-7.

[26] 何小峰, 岳馨钰, 王益, 等. 瓦罐鸡汤主要滋味物质研究[J]. 食品科学, 2010, 31(22): 306-310.

[27] YIN Xiao-fei, LUO Yong-kang, FAN Hong-bing, et al. Effect of previous frozen storage on quality changes of grass carp (*Ctenopharyngodonidellus*) fillets during short-term chilled storage [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2014, 49(6): 1 449-1 460.

[28] 张晓洁, 张宇昊, 马良, 等. 超声辅助提取兔皮胶原蛋白及其理化特性[J]. 食品与机械, 2017, 33(1): 167-171.

[29] 朱文慧, 宦海珍, 步营, 等. 不同解冻方式对秘鲁鲑鱼肌肉保水性和蛋白质氧化程度的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(11): 6-11.

[30] ESTEVEZ M, OLLILAINEN V, HEINONEN M. Analysis of protein oxidation markers alpha-amino adipic and gamma-glutamic semialdehydes in food proteins using liquid chromatography (LC)-electrospray ionization (ESI)-multistage tandem mass spectrometry (MS)[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2009, 57(9): 3 901-3 910.

[31] 苏赵, 胡强, 李树红, 等. 海藻糖对草鱼鱼糜冻藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(7): 139-144.

[32] 吴菊清, 邵俊花, 魏朝贵, 等. 离子强度对猪肉肌原纤维蛋白乳化特性和理化特性的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(23): 14-19.

[33] TONON R V, GROSSO C R F, HUBINGER M D, et al. Influence of emulsion composition and inlet air temperature on the microencapsulation of flaxseed oil by spray drying[J]. Food Research International, 2011, 44(1): 282-289.